

**VÄLIRAPORTTI 250 kN:n ja 300 kN:n
AKSELIPAINOJEN RATATEKNISISTÄ
TUTKIMUKSISTA**

- o **Matti Levomäki**
- o **Jarkko Valtonen**

**VÄLIRAPORTTI 250 kN:n ja 300 kN:n
AKSELIPAINOJEN RATATEKNISISTÄ
TUTKIMUKSISTA**

- o Matti Levomäki**
- o Jarkko Valtonen**

RHK
RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

PUH. (09) 5840 5111
FAX. (09) 5840 5140
SÄHKÖPOSTI: info@rhk.fi

ISBN 952-445-035-6
ISSN 1455-2604

Levomäki, Matti ja Valtonen, Jarkko: Väliraportti 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen rata-teknisistä tutkimuksista. Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. Helsinki 2000. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 6/2000. 28 s. ISBN 952-445-035-6, ISSN 1455-2604.

Avainsanat: rautatieliikenne, akselipainot

TIIVISTELMÄ

Tämä väliraportti on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998. Raportti on tehty Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa (TKK/TIE) Otaniemessä.

Tässä raportissa esitellään lyhyesti tähän mennessä tehtyjen tutkimusten tuloksia. Lisäksi esitellään eri tutkimusten tuloksina syntyneitä jatkotutkimus- tai toimenpideehdotuksia. Raportti perustuu aiemmin julkaistuihin tutkimusraportteihin ja asian tuntijoiden haastatteluihin.

Radan rakenteen kuormat

Nykyisin suurin sallittu dynaaminen pystypyöräkuorma (Q) on 170 kN. Dynaamisen pystykuorman oletetaan vaihtelevan hyväkuntoisella radalla staattisen kuorman kertoimena välillä $1,5 \times$ akselipaino ($V < 60$ km/h) ... $2 \times$ akselipaino ($V=250$ km/h). Suurin sallittu dynaaminen poikittaispyöräkuorma (Y) on 70 kN. Poikittais- ja pystyvoimien suhde eli ns. suistumiskriteeri saa olla enintään 0,8 ($Y/Q \leq 0,8$). 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainoista aiheutuvaa dynaamista pyöräkuormaa ei voida yleisellä tasolla tietää.

Dynaaminen pyöräkuorma on riippuvainen vaunun ominaisuuksista. Telirakenteilla voidaan vaikuttaa dynaamisen pyöräkuorman suuruuteen. Ruotsissa sallitaan 250 kN:n akselipaino, jos suurin sallittu dynaaminen pystypyöräkuorma on enintään 170 kN:ssa. Suomessa voitaneen noudattaa samaa käytäntöä. Poikittaispyöräkuorman ei oleteta kasvavan akselipainon kasvaessa 250 kN:iin. On todennäköistä, että 300 kN:n akselipainoilla dynaaminen pyöräkuorma ei pysy sallituissa 170 kN:ssa (Q) ja 70 kN:ssa (Y).

Rautatiesiltojen ja siltamaisten erikoisrakenteiden kuormat on esitetty Rautatiesiltojen suunnitteluohjeessa (RSO). RSO:n mukaisia kuormia käytetään myös rakenteiden mitoituksessa silloin, kun paalulaatan, rummun tai muun vastaavan rakenteen yläpinnan etäisyys radan korkeusviivasta on pienempi kuin 1,4 m. RSO:n mukaiset kuormat kattavat 250 kN:n akselipainot. 300 kN:a ja sitä raskaampia akselipainoja ajatellen on kuormakaaviota muutettava. 300 kN:n akselipainolle on laadittu kuormakaavio, jolle on tässä annettu nimi RHK-2000.

Radan stabiliteetilaskelmien yhteydessä liikennekuormana käytetään metripainona 120 kN / raidemetri. Kuorman otaksutaan vaikuttavan pystysuuntaan ja siihen sisältyvät sysäysohjeet. Kuorma on väsyttävä ja dynaaminen. Paaluperustusten mitoituksessa tulee lisäksi ottaa huomioon maanpaineesta aiheutuvat vaakakuormat. Olemassa olevan tiedon mukaan käytössä oleva metripaino kattaa 300 kN:n akselipainot.

Tutkimuksissa esille tulleet yleiset väittämät

- Raskaan tavaraliikenteen vaikutus tärinän aiheuttajana on kiistaton. Asia on todettu myös Suomessa tehdyissä mittauksissa. Yleisesti ollaan sitä mieltä, että akselipainojen kasvattaminen lisää tärinää.
- Kaiken tärinän eliminoiminen on sekä taloudellisesti että teknisesti käytännössä mahdotonta.
- Maanvaraisesti pehmeiköille perustettujen ratojen tärinä kasvaa pituusmassan kasvaessa.
- Lisääntyvän liikennemäärän on havaittu lisäävän sepelin jauhautumista. Jauhautumisen kasvu kiihtyy erityisesti huonolaatuisissa sepelissä. Akselipainon noston osuutta kokonaisuudessa ei vielä yksiselitteisesti tunneta.
- Betoniratapölkkyraiteessa raideseppelin jauhautuminen on selvästi suurempaa kuin puuratapölkkyraiteessa.
- Korkealaatuisella sepelillä saavutetaan tukikerrokselle pidempi kestoikä, mutta yleensä hankintakustannuskin kasvaa. Rataosalle valittavan raideseppelin lujuusluokka tulisi valita sepelitarjouksien elinkaarikustannusvertailun pohjalta, eikä yleispätevien sääntöjen pohjalta.
- Asfalttisilla rakenteilla on useita hyviä ominaisuuksia. Asfalttisten ratarakenteiden käyttäytymistä Suomen olosuhteissa on kuitenkin vielä tutkittava lisää. Erityisesti talven vaikutuksista ei ole riittävästi tietoa.
- Kaikki rummut ovat yksilöitä, vaikka selvää säännönmukaisuutta saman tyyppisten rumpujen kohdalla onkin havaittavissa.
- Vanhoista rummuista on vaikea tai jopa mahdoton sanoa mitään perusteellisia kommentteja. Erityisesti betoniputkilla jatkettujen kivirumpujen kuntoa on vaikea määrittää.
- Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva kvasistaattinen ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnus vastaa hyvin instrumentointikohteessa mitattua todellisen ratapenkereen käyttäytymistä. Rakennekerrosten materiaalien ja pohjamaan mekaaninen käyttäytyminen tulee tällöin kuvata jännitystason vaikutuksen huomioon ottavalla materiaalimallilla, jonka parametrit on määritetty todellista kuormitustilannetta vastaavalla jännitys- ja muodonmuutostasolla tehtyihin laboratoriomäärittelyihin perustuen.

250 kN akselipainon käyttöönottoon liittyvät tutkimuksissa esille tulleet väittämät

- Korotettujen akselipainojen käyttöönottaminen korostaa tarvetta käsitellä ratarakennetta kokonaisuutena, jossa alus- ja päällysrakenne ovat keskenään tasapainossa ja jossa kunkin kerroksen materiaalit ovat lujuudeltaan ja rakeisuudeltaan korotettujen akselipainojen asettamia vaatimuksia vastaavat.
- Akselipainon noston vaikutusta jopa hyvin tunnetun ja dokumentoidun rummun käyttäytymiseen on erittäin hankala arvioida.

- Käytössä olevat routalevyt eivät välttämättä kestä nykyisiääkään akselipainoja rikkoutumatta ja kostumatta. Kuitenkaan eivät 19 vuotta vanhat levyt olleet ollenkaan niin huonossa kunnossa kuin pelättiin, vaan pikemminkin päinvastoin. Kaksikerrosrakenne ja hiekkasuojaus ylläpitävät eristeen toimintakykyä hyvin.
- Kun siltojen päätarkastustoiminassa seulotaan huonokuntoiset sillat, ei akselipainon 250 kN:n käyttöönnotolle ole esteitä.
- Omia testejä akselipainon korottamisen vaikutuksista sepelin jauhautumiseen ei ole tehty. USA:n sekä Ruotsin tutkimusten perusteella akselipainon korottaminen 250 kN:sta 300 kN:iin ja edelleen 350 kN:iin ei merkittävästi lisää sepelin jauhautumista, mikäli kumulatiivinen liikennemäärä ei kasva ja sepeli on lujaa, kuten Suomessa yleensä on.
- Akselipainon korotuksesta 225 kN:sta 250 kN:iin ei ole tukikerrokseen kohdistuvien vaikutusten osalta tutkimustuloksia, mutta em. 300-350 kN:n vaikutusten perusteella on oletettavaa, ettei korotus olennaisesti vaikuta raidesepelin jauhautumiseen.
- Uuden sukupolven vaunujen teleillä on mahdollista korottaa akselipainoja nostamatta rataa kohdistuvia dynaamisia kuormia.

300 kN akselipainon käyttöönottoon liittyvät tutkimuksissa esille tulleet väittämät

- Kun tarkastellaan siltojen kapasiteettia RHK-2000 kuormakaaviolla nykyisillä mitoitusohjeiden kuorma- ja materiaaliasavarmuuskertoimilla, kuuluu rataosuuden Rautaruukki – Haaparanta rautatiesilloista 44 % sellaiseen riskiryhmään, jolle ei voida sallia akselipainojen korotusta 300 kN:iin, 27 % rautatiesilloista on tarkistettava ennen akselipainojen korotusta ja 29 % rautatiesilloista ei vaadi toimenpiteitä. Rataosuuden siltojen yhteenlasketun siltapituuden mukaan jaoteltuna prosenttiosuudet ovat vastaavasti 16%, 49% ja 35%.
- Sillaston uusiminen ja korjaaminen vie aikaa, mikä on otettava huomioon päätettäessä 300 kN:n akselipainon sallimisesta rataverkolla liikennöivällä kalustolla.
- Akselipainot ovat rautateiden olemassaolon aikana aina olleet nousussa. Varautuminen esimerkiksi 30 % suurempiin akselipainoihin nostaa sillan rakennuskustannuksia vain 3 %. Jos huomioidaan vielä liikenteenhoitokustannukset rakennustyön aikana, on kokonaiskustannusten nousu tätäkin pienempi.
- Pohjoismaisia olosuhteita vastaava routamitoitus takaa riittävän alusrakennekerrosten paksuuden kaikkia ajateltavissa olevia akselipainoja silmällä pitäen.

Jatkotoimenpidetarpeet liittyen 250 kN ja 300 kN akselipainon käyttöönottoon

- Uusien siltojen suunnittelussa tulisi kuormakaavio RHK-2000 ottaa pikaisesti käyttöön. Vanhojen siltojen korjaussuunnittelussa tulee niiden kantavuus tarkastaa kuormakaaviolle RHK-2000.

- Dynaamisen pyöräkuorman suureneminen käytettäessä 300 kN akselipainoa on selvitettävä.
- Tukikerroksen antaman sivuttaisvastuksen riittävyys raiteen pitämiseksi paikoillaan on selvitettävä vaakasuuntaisten voimien mahdollisesti kasvaessa.
- Ratapenkereen leveyden riittävyttä tulisi tutkia tarkemmin, koska nykyisellään maassamme käytettävät pengerialueet ovat useimpia muita maita kapeampia.
- Ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden kuvaamiseen saattaisi olla tähänastisten mallinnustarkastelujen perusteella mahdollista rakentaa mallinnusympäristö, jonka avulla rakenteeltaan tunnettujen ratapenkereiden pystysuuntaista jäykkyyttä ja sen vaikutusta muun muassa raiteen rakenneosiin kohdistuviin rasituksiin on mahdollista ennakoita laskennallisesti.
- Diagnostisella junalla saatavien mittaustulosten käsittely voisi olla mielenkiintoinen soveltamisalue edellä kuvatulle ratarakenteen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnusympäristölle
- Pengerleveyden riittävyyteen liittyviä tarkasteluja ehdotetaan ensi vaiheessa jatkettavaksi kehittyneempien mallinnustyökalujen – lähinnä elementtimenetelmän – käyttöön perustuvalla teoreettisella tarkastelulla.
- Korian instrumentointikohteessa kesällä 1999 tehtyihin mittauksiin ehdotetaan täydennyksenä toteutettavaksi toinen mittausjakso keuhäälvelä 2000. Mittausajankohtana ratapenkereen tulisi olla pääosin jäässä, jolloin tulosten perusteella olisi mahdollista arvioida muun muassa radan rakennekerrosten jäätymisestä aiheutuvan jäykkyyden kasvun vaikutusta raiteen rakenneosiin kohdistuviin rasituksiin ja radan ympäristöön leviävän tärinän voimakkuuteen. Edelleen talvimittaukset antaisivat luotettavamman perustan erotella pohjamaassa tapahtuvien muodonmuutosten osuutta kesän 1999 mittauksissa havaituista ratapenkereen kokonaismuodonmuutoksista. (Mittaukset peruttiin leuhon talven takia.)
- Teoreettisen mallinnuksen tuloksia voitaisiin soveltaa nimen omaisesti pengerleveyden vaikutukseen liittyvien tarkastelujen verifiointia palvelevan erillisen instrumentointikohteen yksityiskohtaiseen suunnitteluun. Aikataulullisesti tällaisen kohteen toteutus voisi kuitenkin sijoittua aikaisintaan vuoden 2001 kesälle.
- Rumpujen kunnon seuraamiseksi ei edes huolellinen, perusteellisesti raportoitu kävelytarkastus ole yksin riittävä. Rummuille tulee siltatarkastusten tapaan tehdä päätarkastus noin 10 vuoden välein. Rumpurekisteriä ja rumpujen korjaussuunnittelun ohjeistusta tulee kehittää.
- Rumpujen rakenteellisiin laskelmiin ja mallinnukseen perustuvan tutkimuksen tulee varmistaa rakenteiden kantavuus 250 kN ja 300 kN vastaaville akselipainoille.
- Junan kulkuominaisuuksien tarkastelu simuloinnin avulla voisi olla tarpeellinen jatkotutkimusaihe. Erityisesti pyrittäisiin hankkimaan tietoa pyöräkosketuksessa vaikuttaviin voimiin. Työ olisi sopivinta aloittaa tutustumalla ruotsalaisiin simulointitutkimuksiin.

Tällä hetkellä jo käynnissä olevia tutkimuksia ovat:

- Sepelin jauhautumistutkimus, minkä TTKK/RGL toteuttaa.
- Instrumentoinnin jatkotutkimus. Korian mittauksia on tarkoitus jatkaa maaliskuussa. Myös tärinää mitataan. (Peruttu leudon talven takia.)
- Neljän kuukauden mittainen kirjallisuus- ja haastattelututkimus raiteesta aloitettiin tammikuussa 2000. Tutkimus sisältää kiskot, kiskonkiinnityselimet ja pölkyt.
- Rumpututkimus. Yhteistyö ruotsalaisten kanssa on alkuvaiheessa.
- Kunnossapito ja kunnossapitokustannukset. Teknistaloudellinen tarkastelu on tärkeä. Paljonko kunnossapitokustannukset muuttuvat, kun akselipainoja nostetaan?
- Yhteispohjoismainen tärinä tutkimus "Joint Nordic Railway Vibration Research Project – NORDVIB". Raskaan tavaraliikenteen aiheuttamaa tärinää joudutaan ympäristömielessä tutkimaan joka tapauksessa.

Tulossa olevia tutkimuksia ovat:

- Kulkuvastus ja kallistus -tutkimuksessa tutkittavia asioita olisivat ilmeisesti kulkuvastus, kallistus (negatiivinen sivukiihtyvyys) ja dynaamiset kuormat 300 kN:n akselipainoilla liikennöitäessä.
- Siltojen kantavuustarkasteluohjeeseen liittyvät selvitykset.
- Vaihteet.
- Routalevytutkimus.
- Asfaltti päällysrakenteissa, erityisesti tunnelissa.
- Loppuraportti. Tutkimuksen tulosten läpikäynti ja vertailu normeihin.

ESIPUHE

Tämä väliraportti on tehty Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa (TKK/TIE) Otaniemessä. Raportti on osa Ratahallintokeskuksen (RHK) 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon tähtäävää tutkimusprojektia, joka aloitettiin kesällä 1998. Raportissa käydään lyhyesti läpi tähän mennessä tehtyjen tutkimusten tuloksia. Lisäksi esitellään eri tutkimusten tuloksina syntyneitä jatkotutkimus- tai toimenpide-ehdotuksia. Raportti perustuu aiemmin julkaistuihin tutkimusraportteihin ja asiantuntijoiden haastatteluihin.

Raportin ovat tehneet Jarkko Valtonen ja Matti Levomäki Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriosta. Työtä on ohjannut Pasi Leimi RHK:sta. Koko tutkimusprojektia on ohjannut johtoryhmä, jonka jäseninä ovat olleet Markku Nummelin, Pasi Leimi ja Kari Ojanperä Ratahallintokeskuksen teknisestä yksiköstä, Olli-Pekka Hartikainen, Jarkko Valtonen, Matti Levomäki ja Iikka Järvenpää TKK:sta, Raimo Uusinoka ja Pauli Kolisoja TTKK:sta ja Seppo Kähkönen ANSERI-Konsultit Oy:stä.

Helsingissä, heinäkuussa 2000

Ratahallintokeskus
Tekninen yksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ESIPUHE	8
SISÄLLYSLUETTELO	9
1. ESISELVITYS.....	10
2. RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMA TÄRINÄ.....	11
3. RAUTATIESILTOJEN LUOKITTELU JA INVENTOINTIRATA- OSUUDELLA RAUTARUUKKI – HAAPARANTA AKSELIPAINOJEN KOROTTAMISTA VARTEN	12
3.1 Yhteenveto	12
3.2 Yleiset kriteerit, toimenpiteet ja havainnot.....	12
3.3 Jatkotoimenpiteet	14
4. LIIKKUVA KALUSTO	15
5. TUKIKERROS JA ALUSRAKENNE	16
6. RUMMUT.....	19
7. INSTRUMENTOINTI JA MALLINNUS.....	21
8. ROUTALEVYT	24
8.1 Esiselvitys routalevyistä	24
8.2 Liite esiselvitykseen routalevyistä	24
8.3 Olemassa olevien routalevyjen kunnon kartoittaminen	25
8.4 Uudet routalevyt.....	25
9. MATKAT.....	27
9.1 Venäjä.....	27
9.2 Ruotsi.....	27

1. ESISELVITYS

Tutkimusprojekti aloitettiin vuonna 1998 esiselvityksellä olemassa olevasta materiaalista. Aluksi toteutettiin kirjallisuushaku ja myöhemmin instrumentointia käsittelevä alustava kirjallisuustutkimus.

Luetteloitavia teoksia haettiin RHK:n arkiston lisäksi asiantuntijoiden huoneista, Oy VR-Rata Ab:stä, Tampereen teknillisestä korkeakoulusta (TTKK) ja Teknillisestä korkeakoulusta (TKK) sekä Internetistä. Tutkimuksessa jaoteltiin löydetty materiaali viiteentoista eri luokkaan akselipainojen mahdollista nostamista silmälläpitäen. Näitä luokkia ovat:

Liikkuva kalusto, geometria, kiskot, kiskonkiinnityselimet, ratapölkkyt, tukikerros, alusrakenne, pohjarakenteet, sillat, vaihteet, tärinä, kunnossapito, perusteokset ja instrumentointi.

Luetteloon otettiin periaatteessa mukaan kaikki vähänkin aihealueeseen kuuluvat julkaisut, muistiot, standardit, tutkimustulokset, seminaariraportit, lehtiartikkelit ja muut teokset. Yhteensä kaikkia luetteloituja teoksia on yli tuhat.

Kaikista luetteloiduista teoksista on esitetty vähintään perustiedot tekijöistä ja teoksen kustantajasta tai painopaikasta, vuosiluku, mahdollinen ISBN- tai muu numero, sivumäärä ja mahdollisesti soveliaat luvut (kappaleet) ja teoksen sijaintitiedot. Parhaiten tämä luettelo toimii sähköisessä muodossa, jossa sitä myös koko tämän tutkimuksen ajan päivitetään kattamaan myös myöhemmin löydetyt aihealueeseen liittyvät teokset. Tämä kirjallisuushaku on kokonaisuutena lähdeosa jatkotutkimuksille.

Esiselvityksen kirjallisuustutkimusosuus on lähinnä lähdeosa ratarakenteen instrumentointia suunniteltaessa. Luetteloon on koottu instrumentointiin liittyviä tutkimusraportteja, muistioita ja muita teoksia, joista on hyötyä myöhemmin sekä instrumentointisuunnitelmaa että varsinaisia mittauksia tehtäessä.

Tutkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 1/1999 (ISBN 952-445-014-3, ISSN 1455-2604, 73 sivua) nimellä: **Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus, 250kN:n ja 300 kN:n akselipainot.**

2. RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMA TÄRINÄ

Rautatieliikenteen aiheuttamaa tärinää käsittelevässä kirjallisuustutkimuksessa esitellään lyhyesti tärinän syntymistä ja kulkeutumista. Pääasiallinen mielenkiinnon kohde on kuitenkin ollut raskaampien akselipainojen vaikutus tärinän muodostumisessa ja tärinän vaimentamiseen käytettävät rakenteet ja muut menetelmät. Lähdeaineina on käytetty koti- ja ulkomaisia teoksia, VR:n ja RHK:n aiemmin tilaamia tutkimusraportteja ja tässä yhteydessä tehtyjä haastatteluja.

Tutkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 3/1999 (ISBN 952-445-019-4, ISSN 1455-2604, 37 sivua) nimellä: **Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250kN:n ja 300 kN:n akselipainot.**

Kirjallisuustutkimuksen päätelminä voidaan raskaiden akselipainojen vaikutuksesta tärinään ja tärinän vaimentamiseen käytettävistä menetelmistä todeta seuraavaa:

- Maanvaraisesti pehmeiköille perustettujen ratojen tärinä kasvaa pituusmassan kasvaessa.
- Raskaiden akselipainojen vaikutuksesta tärinän syntymisessä ei ole olemassa tutkimustuloksia. Yleisesti ollaan sitä mieltä, että akselipainojen kasvattaminen lisää tärinää, mutta kaikki tutkimustulokset eivät ole yhdenmukaisia.
- Paikallisiin tärinäolosuhteisiin vaikuttavat liikkuvan junakaluston ja ratapenkereen ominaisuuksien lisäksi muun muassa pohjaolosuhteet, rakennusten perustamis- ja rakennustavat ja myös materiaalit, kerrosten lukumäärä ja rakennusten sijainti.
- Rakennustavalla, -materiaaleilla ja rakennusten sijainnilla näyttäisi olevan huomattavasti suurempi vaikutus tärinään kuin perustuksilla. Paaluperustus on tästä poikkeus.
- Myös rautatien perustaminen paaluille eliminoi tärinän lähes kokonaan. Toisaalta paaluperustus aiheuttaa riskin perustuksen horisontaaliseen liikkeeseen tietyissä tilanteissa.
- Tärinän vaimentaminen tai sen leviämisen estäminen on yleensä parasta tehdä mahdollisimman lähellä tärinälähdettä.
- Tärinän vaimentamista suunniteltaessa on paikalliset olosuhteet tunnettava erittäin hyvin.
- Kaiken tärinän eliminointi on sekä taloudellisesti että teknisesti käytännössä mahdotonta.

Kesällä 1999 tehtiin ratarakenteen instrumentoinnin yhteydessä tärinämittauksia Kouvolan ja Korian välisellä rataosalla. Tärinämittauksia jatketaan keväällä 2000.

Käynnistymässä on yhteispohjoismainen tärinätutkimus ”Joint Nordic Railway Vibration Research Project – NORDVIB”. Rautatieliikenteen aiheuttamaa tärinää joudutaan ympäristömielessä tutkimaan joka tapauksessa.

3. RAUTATIESILTOJEN LUOKITTELU JA INVENTOINTI RATAOSUUDELLA RAUTARUUKKI – HAAPARANTA AKSELIPAINOJEN KOROTTAMISTA VARTEN

3.1 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa on alustavasti selvitetty Rautaruukki - Haaparanta -rataosuudella olevien siltojen (yht. 145 kpl) kantavuutta yleispiirustusten ja muutaman sillan laskelmien pohjalta. Tarkastelussa on käytetty kuormakaaviota RHK-2000 ja nykyisiä mitoitusohjeiden kuorma- ja materiaaliosavarmuuskertoimia. Tarkastelussa on selvitetty onko mahdollista nostaa sallittua akselipainoa nykyisestä 225 kN:sta 250 kN:iin tai jopa 300 kN:iin. Tutkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun sillanrakennustekniikan laboratoriossa. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 7/1999 (ISBN 952-445-026-7, ISSN 1455-2604, 23 sivua) nimellä: **Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki - Haaparanta akselipainojen korottamista varten.**

Kun siltojen päätarkastustoiminnassa seulotaan huonokuntoiset sillat ei 250 kN:n akselipainon käyttöönotolle ole esteitä. 300 kN:n akselipainojen sallimisen tarkastelun tuloksena sillat on jaettu riskiluokkiin, joiden pohjalta silloille on löydetty kriteereitä eri asteisia korjaus-, kunnossapito- ja uusimistimenpiteitä varten. Uusi kuormakaavio RHK-2000 olisi otettava käyttöön suunnittelussa mahdollisimman pian.

Kun tarkastellaan siltojen kapasiteettia RHK-2000 kuormakaaviolla nykyisillä mitoitusohjeiden kuorma- ja materiaaliosavarmuuskertoimilla, työ osoittaa, että rataosuuden Rautaruukki – Haaparanta rautatiesilloista 44 % kuuluu sellaiseen riskiryhmään, jolle ei voida sallia akselipainojen korotusta 300 kN:iin, 27 % rautatiesilloista on tarkistettava ennen akselipainojen korotusta ja 29 % rautatiesilloista ei vaadi toimenpiteitä. Rataosuuden siltojen yhteenlasketun siltapituuden mukaan jaoteltuna prosenttiosuudet ovat vastaavasti 16 %, 49 % ja 35 %

Jos olemassa olevan rakenteen kantavuuden tarkastelussa käytetään kuormina ominaisjunia kuormakaavioiden sijasta ja kuormalle pienempiä osavarmuuskertoimia, prosenttiosuudet muuttuvat seuraavasti: rautatiesilloista 20 % kuuluu sellaiseen riskiryhmään, jolle ei voida sallia akselipainojen korotusta 300 kN:iin, 55 % rautatiesilloista on tarkistettava ennen akselipainojen korotusta ja 25 % rautatiesilloista ei vaadi toimenpiteitä.

3.2 Yleiset kriteerit, toimenpiteet ja havainnot

Jos alusrakenteista ei löydy laskelmia, on sillalle syytä tehdä erikoistarkastus, millä selvitetään tarkemmin rakenteen kunto ja mahdollisten puupaalujen kantavuus. Rataosan siltojen väsytysskapasiteettiin vaikuttaa rakenteen materiaaalimittojen lisäksi bruttotonnimäärä, joka on kuormittanut rakennosaa sen eliniän aikana. Rautatiesiltojen suunnitteluohjeessa jännityskertymän arvoa laskettaessa on lähtöarvoksi oletettu 100 vuoden kestoaikalle liikennemääräksi 19 miljoonaa bruttotonnia / raide / vuosi vuosien 1975-2000 ominaisjunille. Tällä rataosalla kertyneet bruttotonnimäärät ovat huomattavasti pienemmät. Lisäksi vuosisadan alkupuoliskon ominaisjunien pienempien

akselipainojen vuoksi niiden väsyttävä vaikutus on pienempi kuin vuosisadan loppupuolen ominaisjunilla. [VTT:n raportti 1570 Teräsiltojen käyttöikä, sivu 21]

Suunnittelukuorman ja kertyneen bruttotonnimäärän vaikutus voidaan ottaa huomioon *ENV 1993-2, Eurocode 3, Part 2*. esitetyllä tavalla. Niillä rataosuuksilla, joilla 250 kN akselipaino on jo käytössä, on kunnossapito- ja tarkastustoimenpiteitä tehostettava silloilla, jotka on mitoitettu I-48 tai vanhemmalle kuormakaavioille sillan kunnan ennenaikaisen heikkenemisen havaitsemiseksi. Jos sillan laskennallinen kantavuus suunnittelukuormilla on saavutettu, vaatii käyttökuorman kasvattaminen sillan vahvistamista tai uusimista.

Vanhojen siltojen korjaamisessa ja uusien siltojen suunnittelussa tulisi kuormakaavio RHK-2000 ottaa pikaisesti käyttöön. Vanhojen siltojen korjaussuunnittelussa tulee niiden kantavuus tarkastaa kuormakaavio RHK-2000. Akselipainot ovat rautateiden olemassaolon aikana aina olleet nousussa. Varautuminen esim. 30 % suurempiin akselipainoihin nostaa sillan rakennuskustannuksia vain noin 3 %. Jos huomioidaan vielä liikenteenhoitokustannukset rakennustyön aikana on kokonaiskustannusten nousu tätäkin pienempi. Sillaston uusiminen ja korjaaminen vie aikaa, mikä on otettava huomioon päätettäessä 300 kN:n akselipainon sallimisesta rataverkolla liikennöivällä kalustolla.

Siltatyypit ja rakenneosat, jotka vaativat kantavuuden tarkempaa selvittämistä:

- Vanhojen teräksisten siltojen poikkipalkit ja sekundääriset pituuskannattajat, joille on pitkän eliniän aikana tullut suuri vaihtojännityskertymä.
- Vanha yksiaukkoinen laattakehäsilta; rakenteet saattavat vaatia vahvistamista.
- Vanhat laakerialustat tai laakerit, erityisesti lyhyissä silloissa.

Siltatyypit ja rakenneosat, jotka vaativat merkittäviä vahvistamistoimenpiteitä tai rakenteiden uusimista, jos akselipaino nostetaan 300 kN (mitoitusteruste RHK-2000):

- 1-aukkoinen teräsbetonisilta, joka on mitoitettu I-48 tai vanhemmalle kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 15 m.
- 1-aukkoinen terässilta, joka on mitoitettu I-26 tai vanhemmalle kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 27,5 m.
- 1-aukkoinen terässilta, joka on mitoitettu I-48 –kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 17,5 m.
- 1-aukkoinen teräsbetoni- tai terässilta, joka on mitoitettu VR-74 –kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 5 m.
- Vanhat perustukset, usein ns. ”kallmur”, joista ei löydy laskelmia.
- Paalutetut maatumakirakenteet, joissa paaluryhmässä on pääasiassa pystysuoria puupaaluja.

Siltatyypit ja rakenneosat, jotka saattavat vaatia merkittäviä vahvistamistoimenpiteitä tai rakenteiden uusimista akselipainon ollessa nykyinen 250 kN (mitoitusteruste VR-74):

- 1-aukkoinen teräsbetonisilta, joka on mitoitettu I-48 tai vanhemmalle kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 6 m.
- 1-aukkoinen terässilta, joka on mitoitettu I-26 tai vanhemmalle kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 22,5 m.

- 1-aukkoinen terässilta, joka on mitoitettu I-48 –kuormakaavioille ja jonka jännemitta on alle 10 m.
- Vanhat perustukset, usein ns. "kallmur", joista ei löydy laskelmia.
- Paalutetut maatukirakenteet, joissa paaluryhmässä on pääasiassa pystysuoria puupaaluja.

3.3 Jatkokotoimenpiteet

Suoritettu tarkastelu osoittaa, että rataosan Rautaruukki - Haaparanta siltojen käyttökelpoisuus 250 kN:n akselipainoille on melko hyvä. Ennen kuin liikennöivissä junissa siirrytään käyttämään 300 kN:n akselipainoja, siltakannan kantavuus tulee selvittää tarkemmin erikoistarkastuksin ja laskelmin. Selvitysten tekemiseksi tarvitaan olemassa olevien rakenteiden kapasiteetin laskentaohjeet.

Kapasiteettiselvityksen tulee sisältää ainakin seuraavat kohdat:

- erikoistarkastukset
- materiaalikokeet kantavista rakenteista otetuista näytteistä
- rakenteen mittojen tarkistaminen
- kantavuuksien tarkemmat laskennalliset selvitykset
- väsymistarkastelut ja jäljellä olevan käyttöiän arviointi

Sysäyskertoimen vaikutuksen osuus on suuri mitoituskuormassa. Kaluston ominaisuuksia parantamalla voidaan pienentää sysäyslisää. Sysäyslisä on pienempi myös hyvässä kunnossa olevalla raiteella. Vanhojen tukikerroksettomien teräsiltojen osalta raiteen ominaisuuksia voidaan parantaa teräsrakenteen ja pölkyn väliin valettavalla vaimennuskerroksella. Vanhoissa terässilloissa erityisesti sekundäärirakenteiden kapasiteettia voitaisiin nostaa tällä keinolla. Tätä tekniikkaa tulee kehittää.

4. LIIKKUVA KALUSTO

Liikkuvaa kalustoa käsittelevä tutkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun auto- ja työkonetekniikan laboratoriossa vuonna 1999. Raportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 3/2000 (ISBN 952-445-031-3, ISSN 1455-2604, 62 sivua) nimellä: **Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus, 250 kN ja 300 kN akselipainot**. Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin akselipainojen mahdollisen noston vaikutuksia liikkuvan kaluston aiheuttamiin dynaamisiin kuormituksiin sekä itse liikkuvaan kalustoon.

Juna aiheuttaa sekä pysty- että vaakasuuntaisia dynaamisia voimia, jotka kaikki välittyvät rataan noin peukalonpään kokoisten kosketuspinta-alojen kautta. Pystysuunnassa dynaamista kuormitusta aiheuttavat kiskon ja pyörän virheet sekä radan jäykkyyden vaihtelu pituussuunnassa. Pyörä-kisko -kosketuskuormalla on kaksi dynaamista päätyyppiä. Matalataajuinen (alle 10 Hz) kuormitus johtuu kosketuspisteen siirtymisestä eteenpäin junan nopeudella. Korkeataajuinen kuormitus johtuu kiskon ja pyörän epäsäännöllisyyksistä, joista merkittävin on pyörässä oleva lovi. Loven voimavaikutus on likipitään suoraan verrannollinen ja karkeasti arvioiden 2...4-kertainen staattiseen kuormaan nähden. Akselipainon noustessa on suhtauduttava erittäin kriittisesti lovipyörien esiintymiseen.

Tutkimuksen tuloksina voidaan esittää mm. seuraavaa:

- Loven vaikutuksen suuruus riippuu loven pituudesta, pyöräkuormasta, jousittamattomasta massasta, ajonopeudesta ja radan joustosta.
- Kiskon kestävyys junakuorman aiheuttaman taivutusväsytyksen suhteen voidaan laskea, mutta vaikuttavia parametrejä on paljon ja niitä on vaikea määritellä tarkasti.
- 250 kN:n ja 300 kN:n akselipaino edellyttää uutta kalustoa, jonka aiheuttama dynaaminen kuormitus tulee selvittää kalustoa tyyppihyväksyttäessä, jolloin myös suurimmat sallitut nopeudet määritetään.
- Pyörän ja kiskon lujittaminen erikoispinnoitteella on ruotsalaisten kokemusten mukaan osoittautunut hyväksi menetelmäksi.

Kehittyneiden telityyppien vaikutukset kulkuvastuksiin ja veturin energiankulutukseen tulee selvittää. Myös junan kulkuominaisuuksien tarkastelu simuloinnin avulla voisi olla tarpeellinen jatkotutkimusaihe. Erityisesti pyrittäisiin hankkimaan tietoa pyöräkosketuksessa vaikuttaviin voimiin. Työ olisi sopivinta aloittaa tutustumalla ruotsalaisiin simulointitutkimuksiin.

5. TUKIKERROS JA ALUSRAKENNE

Tukikerrosta ja alusrakennetta käsittelevä kirjallisuustutkimus tehtiin Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorion (TTKK/GEO), Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratorion (TTKK/RGL) ja Teknillisen korkeakoulun tielaboratorion (TKK/TIE) yhteistyönä. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 6/1999 (ISBN 952-445-025-9, ISSN 1455-2604, 135 sivua) nimellä: **Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot**. Tukikerroksesta on tehty lisäksi DI-työ (TTKK/RGL), joka valmistui helmikuussa 2000. Työ ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 4/2000 (ISBN 952-445-032-1, ISSN 1445-2604, 93 sivua) nimellä: **Raidesepelin lujouden vaikutus tukikerroksen kestoikään**.

Kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli tehdä yhteenveto sallittujen akselipainojen noston vaikutuksista radan tukikerrokseen ja sen alla olevaan alusrakenteeseen. Lähtökohtana työssä oli RHK:n teettämän kirjallisuushaun yhteydessä koottu aineisto. DI-työssä tarkoituksena on kirjallisuuteen ja omiin testituloksiin perustuen arvioida edullisimman raidesepeliläadun valintaa erilainen kestoikä ja hankintakustannus huomioiden.

Tukikerroksessa keskeisiä selvitettäviä asioita olivat akselipainojen korottamisen vaikutukset raidesepelin laatuvaatimuksiin ja tukikerroksen dimensioihin. Alusrakenteessa selvitys painottui rakennekerrosten materiaalien laatuvaatimuksiin, rakennekerrosten dimensioille asetettaviin vaatimuksiin sekä rakennekerrosten materiaalien mekaanista käyttäytymistä kuvaavien mallien ja niiden tyypillisten parametrien kartoittamiseen. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin ratarakenteissa käytettävien routalevyjen laatuvaatimuksia sekä asfaltin käyttömahdollisuuksia ratarakenteissa.

Koko kirjallisuustutkimuksen ja DI- työn johtopäätöksinä voidaan todeta, että

- Raidesepelin jauhautumista voidaan vähentää seuraavilla toimenpiteillä:
 - Minimoidaan tukikerrokseen kohdistuva iskevä rasitus, jota syntyy kiskoatkoksissa, huonoissa hitsiliitoksissa, epätasaisella raiteella, vioittuneissa raiteen kohdissa sekä kuluneista pyöristä.
 - Minimoidaan tukeminen. Minimoidaan ratapenkereen ja pohjamaan painuminen ja siten syntyvä tukemistarve.
 - Minimoidaan rataa asennusvaiheessa sepelin sisältämän hienoaineksen määrä ja varmistetaan, että rakeisuusjakauma tarjoaa riittävän huokostilan.
 - Käytetään puuratapölkkyjä.
 - Käytetään jäykkää kiskoa.
 - Käytetään kovaa ja sitkeää kiviainesta, joka ei ole altis rapautumiselle.
 - Käytetään muodoltaan kuutiomaista kiviainesta.
 - Minimoidaan tukikerrokseen ylhäältä päin, pääasiassa avovaunuista kulkeutuva hienoaines.
 - Varmistetaan riittävällä tukikerrospaksuudella ja välikerroksen rakeisuudella, ettei alusrakenne pääse tunkeutumaan tukikerrokseen.
 - Varmistetaan tukikerroksen hyvä kuivatus.

- Rataosan kumulatiivisella liikennemäärällä on todettu olevan suurin vaikutus raideseppelin jauhautumiseen ja siten tukikerroksen kestoikään.
- Korkealaatuisella sepelillä saavutetaan tukikerrokselle pidempi kestoikä, mutta yleensä hankintakustannuskin kasvaa. Rataosalle valittavan raideseppelin lujuusluokka tulisi valita sepelitarjouksien elinkaarikustannusvertailun pohjalta, eikä yleispätevien sääntöjen pohjalta.
- Suuren vuotuisen liikennemäärän rataosilla saattaa raideseppelin kuljettaminen kaukaakin olla elinkaaren kokonaiskustannuksia ajatellen järkevin ratkaisu. Vastaavasti vähän liikennöidyillä rataosilla hankintakustannuksiltaan halvin sepeli on usein myös kokonaistaloudellisin.
- Omia testejä akselipainon korottamisen vaikutuksista sepelin jauhautumiseen ei ole tehty. USA:n sekä Ruotsin tutkimusten perusteella akselipainon korottaminen 250 kN:sta 300 kN:iin ja edelleen 350 kN:iin ei merkittävästi lisää sepelin jauhautumista, mikäli kumulatiivinen liikennemäärä ei kasva ja sepeli on lujaa, kuten Suomessa yleensä on.
- Akselipainon korotuksesta 225 kN:sta 250 kN:iin ei ole tukikerrokseen kohdistuvien vaikutusten osalta tutkimustuloksia, mutta em. 300 – 350 kN vaikutusten perusteella on oletettavaa, ettei korotus olennaisesti vaikuta raideseppelin jauhautumiseen.
- Korotettujen akselipainojen käyttöönottoaminen korostaa tarvetta käsitellä ratarakennetta kokonaisuutena, jossa alus- ja päällysrakenne ovat keskenään tasapainossa ja jossa kunkin kerroksen materiaalit ovat lujuudeltaan ja rakeisuudeltaan korotettujen akselipainojen asettamia vaatimuksia vastaavat.
- Akselipainon noston vaikutus alusrakennekerrokseen on merkittävin välikerroksessa ja eristyskerroksen yläosassa. Tähän liittyen välikerroksen paksuuden kasvattamista nykyisestä 150 mm:stä olisi syytä harkita. Rakeisuusjakautumaltaan hyvin tasarakeisten, kuormituskestävyydeltään heikkojen sekä rapautumisalttiiden kiviainesten käyttöä eristyskerroksen yläosassa tulee niin ikään välttää.
- Pohjoismaisia olosuhteita vastaava routamitoitus takaa riittävän alusrakennekerrosten paksuuden kaikkia ajateltavissa olevia akselipainoja silmällä pitäen.
- Ratapenkereen leveyden riittävyyttä tulisi tutkia tarkemmin, koska nykyisellään maassamme käytettävät pengerleveydet ovat useimpia muita maita kapeampia.
- XPS -routalevyjen testaus pitäisi periaatteessa suorittaa nykyisten CEN-normien mukaisesti. XPS -routalevyyn staattisen puristuslujuuden ja sallitun toistokuormituskertamäärien välisen riippuvuuden selvittäminen onnistuu käytännössä ainoastaan riittävillä laboratoriokokeilla.
- Asfalttisilla rakenteilla on useita hyviä ominaisuuksia. Asfalttisten ratarakenteiden käyttäytymistä Suomen olosuhteissa on kuitenkin vielä tutkittava lisää. Erityisesti talven vaikutuksista ei ole riittävästi tietoa.

- Ratapenkereen pystysuuntaista jäykkyyttä ('track modulus') voidaan mallintaa suhteellisen yksinkertaista lineaarista kerrosrakennemallia käyttäen. Rakennekerrosten mekaanista käyttäytymistä kuvaavat materiaaliparametrit tulee tällöin kuitenkin tuntea jännitystasosta riippuvina.
- Ratapenkereen leveyden vaikutuksen mallintaminen edellyttää sen sijaan kehittyneempien laskentamenetelmien – lähinnä elementtimenetelmän eli FEM:n - käyttöä. Tällöinkin mallinnuksen tulos tulee kalibroida todellisten rakenteiden käyttäytymisestä ja mahdollisesti myös nimenomaan tähän tarkoitukseen suunniteltujen instrumentointikohteiden toiminnasta tehtävien havaintojen avulla.

6. RUMMUT

Rumpututkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 8/1999 (ISBN 952-445-027-5, ISSN 1455-2604, 27 sivua) nimellä: **Ratarumpujen maastaselvitys 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot**. Tutkimus toteutettiin siten, että Oulun ja Kemian rata-alueiden rumpukortistojen perusteella rummut luetteloidiin. Alustavan selvitystyön jälkeen rumpuihin käytiin tutustumassa Raahen ja Tornion välisellä rataosalla.

Rumpututkimuksen päätelminä voidaan raskaiden akselipainojen vaikutuksesta todeta seuraavaa:

- Kaikki rummut ovat yksilöitä, vaikka selvää säännönmukaisuutta saman tyyppisten rumpujen kohdalla onkin havaittavissa.
- Vanhoista rummuista on vaikea tai jopa mahdoton sanoa mitään perusteellisia kommentteja. Erityisesti betoniputkilla jatkettujen kivirumpujen kuntoa on vaikea määrittää.
- Kivirummut tuntuivat olevan pääsääntöisesti hyvässä kunnossa. Ruotsalaisella malmiradalla myös kivirumpujen kivet ovat liikkuneet raskaiden akselipainojen vaikutuksesta aiheuttaen muun muassa sepelin valumista rumpuun.
- Betonirakenteet olivat paikoin melko huonossa kunnossa.
- Jatkettujen rumpujen sisäosien kuntoa on hankala määrittää.
- Rumpujen perustamisratkaisuja ei voi yleensä arvioida silmämääräisesti lainkaan. Useimmiten perustaminen on ilmeisesti tehty soralle.
- Rumpukortistojen tiedot eivät välttämättä ole täsmälleen oikeita. On jopa mahdollista, että joitain rumpuja ei ole luetteloitu lainkaan.
- Akselipainon noston vaikutusta jopa hyvin tunnetun ja dokumentoidun rummun käyttäytymiseen on erittäin hankala arvioida.

Tornio – Raahen rataosan osalta voidaan todeta seuraavaa:

- Jos Tornio – Raahen rataosalla aiotaan joskus ajaa nykyistä raskaammilla akselipainoilla, kaikki rummut on syytä tutkia. Käytännössä tärkeintä on toteuttaa kävelytarkastus erityisen huolellisesti. Kävelytarkastusten perusteella huomataan vaurioituvat rummut ja voidaan varautua korjauksiin.
- Kävelytarkastus ei ole yksin riittävä rumpujen kunnan seuraamiseksi. Rummuille tulee siltatarkastusten tapaan tehdä päätarkastus noin 10 vuoden välein. Ainakin tarkastuksen raportointia on tarpeen tehostaa. Rumpujen tarkastusjärjestelmää ja rumpurekisteriä tulee kehittää.
- Rumpujen korjaussuunnittelun ohjeistusta tulee kehittää. Tutkimuksen, jonka tulee perustua rumpujen rakenteellisiin laskelmiin ja mallinnukseen, tulee varmistaa rakenteiden kantavuus 250 kN:n ja 300 kN:n vastaaville akselipainoille.

Yleisiä jatkotoimintatarpeita voidaan luetella seuraavasti:

- Yleisluotoinen selvitys rataverkolla olevien rumpujen rakenteista, rumpujen jatkamistekniikoista sekä rumpujen yleisimmistä vaurioita ja niiden korjaamisesta.
- Yhteistyö Ruotsin Banverketin, TTKK:n ja Luleå Tekniska Universitetin sekä mahdollisesti myös Norjan Jernbanverketin kanssa rumpurakenteiden ja mitoituksen kehittämisestä.
 - Selvitykset nykyisistä rumpujen mitoitusmenetelmistä
 - Koerakentaminen
 - mittaukset lyhytaikaisessa kuormituksessa
 - pitkäaikaiset muodonmuutosmittaukset (3 – 4 –vuoden jakso)
- Mittaustulosten analysointi ja laskentamallien kehitys ja vertailu
 - Suositukset rumpujen rakenteellisista vaatimuksista sekä mitoitusmenetelmistä
- Rummun rakentamisen yleinen työselitys ja laatuvaatimukset

7. INSTRUMENTOINTI JA MALLINNUS

Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma tehtiin Tampereen teknillisen korkeakoulun geotekniikan laboratorion (TTKK/GEO), Teknillisen korkeakoulun lujuusopin laboratorion (TKK/LUJ) ja Teknillisen korkeakoulun tielaboratorion (TKK/TIE) yhteistyönä. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 4/1999 (ISBN 952-445-020-8, ISSN 1455-2604, 30 sivua) nimellä: **Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250kN:n ja 300 kN:n akselipainot.**

Suunnitelmassa selvitettiin Kouvolan ja Korian väliselle rataosuudelle kilometrilukeman 187+580 kohdalle kesällä 1999 tehdyn ratarakenteen instrumentointimenetelmiä, työvaiheita, kustannuksia ja tulosten käsittelyä.

Suunnitelman mukaisen instrumentoinnin tavoitteena oli saada tietoa erisuuruisten junakuormien ratarakenteelle aiheuttamista rasituksista ja niiden jakautumisesta ratapenkereessä. Mittausten perusteella voidaan testata raiteen ja ratapenkereen mallinnuksen toimivuutta ja oikeellisuutta ja myöhemmin arvioida mahdollisuuksia 250kN:n ja 300 kN:n akselipainojen käyttöönottoon. Tutkimusraportti ilmestyi Ratahallintokeskuksen julkaisuna A 5/2000 (ISBN 952-445-033x, ISSN 1455-2604, 137 sivua) nimellä: **Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot.**

Johtopäätökset

Yleisesti ottaen Korian instrumentointikohteessa tehtyjen mittausten tulosten ja niiden tähänastisten analysointien voidaan katsoa vahvistavat tukikerrosta ja alusrakennetta käsitelleen kirjallisuusselvityksen yhteydessä tehtyjä johtopäätöksiä. Niinpä koekohteen instrumentoinnin ja alustavan mallinnuksen perusteella voidaan todeta seuraavaa:

- Lineaariseen kerrosrakennemalliin perustuva kvasistaattinen ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnus vastaa hyvin instrumentointikohteessa mitattua todellisen ratapenkereen käyttäytymistä. Rakennekerrosten materiaalien ja pohjamaan mekaaninen käyttäytyminen tulee tällöin kuvata jännitystason vaikutuksen huomioon ottavalla materiaalimallilla, jonka parametrit on määritetty todellista kuormitustilannetta vastaavalla jännitys- ja muodonmuutostasolla tehtyihin laboratoriomäärittelyihin perustuen.
- Erisuuruisia akselipainoja vastaavan, pitkäaikaisessa toistokuormituksessa stabiileetiltaan riittävän pengerleveyden määrittäminen on vaikeusasteeltaan ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden mallintamista selvästi vaativampi tehtävä. Vaikka tähän mennessä tehtyjen mallinnustarkastelujen perusteella ongelmaan ei olekaan esiteltävissä suoraviivaista ratkaisumallia, antavat instrumentointikohteesta saadut mittaustulokset kuitenkin selvää viitettä siitä, että suurilla akselipainoilla tiettyihin osiin ratapengertä kehittyy vaakasuuntaisia syklisiä vetomuodonmuutoksia. Mitä suurempina nämä vetomuodonmuutokset toistuvat, sitä suurempi osa niistä väistämättä myös jää palautumattomiksi, mikä koko ratapenkereen tasolla näkyy sen vähittäisenä latistumisena.

Jatkotutkimustarpeet

Ratapenkereen mekaanista toimintaa kuvaavien mallinnustarkastelujen soveltamiskohteista ja näihin liittyvistä jatkotutkimustarpeista voidaan vastaavasti todeta seuraavaa:

- Tähänastisten mallinnustarkastelujen perusteella näyttäisi siltä, että ratapenkereen pystysuuntaisen jäykkyyden kuvaamiseen olisi mahdollista rakentaa mallinnusympäristö, jonka avulla rakenteeltaan tunnettujen ratapenkereiden pystysuuntaista jäykkyyttä ja sen vaikutusta muun muassa raiteen rakenneosiin kohdistuviin rasituksiin on mahdollista ennakoida laskennallisesti. Likimääräisen tuloksen saamiseksi ratapenkereestä tulee tällöin tuntea vähintään rakennekerrosten paksuudet ja rakeisuusjakautumat sekä pohjamaan maalaji ja tiiviys. Tarvittaessa arviota voidaan tarkentaa rakennekerrosten materiaaleille ja pohjamaalle tehtävin laboratoriotestein. Mallinnusympäristön käytännön toteuttamisessa tulisi ensisijaisesti selvittää olemassa olevien ratarakenteen mallinnusohjelmistojen (esim. GEOTRACK) hyödyntämismahdollisuudet, jotta hankkeeseen liittyvät ohjelmistokehitystyöt eivät muodostuisi laajuudeltaan kohtuuttomiksi.
- Eräs mielenkiintoinen soveltamisalue edellä kuvatulle ratarakenteen pystysuuntaisen jäykkyyden mallinnusympäristölle voisi olla sen yhdistäminen nk. diagnostisella junalla saatavien mittaustulosten käsittelyyn. Mallinnusympäristö voisi tällöin periaatteessa toimia apuvälineenä sekä rataverkon laajamittaisempaan inventointiin liittyvien mittausaineistojen tulkinnassa että yksittäisten ongelmakohteiden toiminnan ja korjausvaihtoehtojen analysoinnissa.
- Pengerleveyden riittävyyteen liittyviä tarkasteluja ehdotetaan ensi vaiheessa jatkettavaksi kehittyneempien mallinnustyökalujen – lähinnä elementtimenetelmän – käyttöön perustuvalla teoreettisella tarkastelulla. Tämän avulla pyritään muodostamaan selkeä käsitys toistokuormitetun ratapenkereen fysikaalisesta toimintatavasta ja ratapenkereen stabiiliteetin kannalta kriittisten kohtien sijainnista. Tämän jälkeen teoreettisen mallinnuksen tuloksia voitaisiin soveltaa nimenomaisesti pengerleveyden vaikutukseen liittyvien tarkastelujen verifiointia palvelevan erillisen instrumentointikohteen yksityiskohtaiseen suunnitteluun. Aikataulullisesti tällaisen kohteen toteutus voisi kuitenkin sijoittua aikaisintaan vuoden 2001 kesälle.
- Täydennyksenä Korian instrumentointikohteessa kesällä 1999 tehtyihin mittauksiin kohteessa ehdotetaan toteutettavaksi toinen mittausjakso kevättalvella 2000. Mittausajankohtana ratapenkereen tulisi olla pääosin jäässä, jolloin tulosten perusteella olisi mahdollista arvioida mm. radan rakennekerrosten jäätymisestä aiheutuvan jäykkyyden kasvun vaikutusta raiteen rakenneosiin kohdistuviin rasituksiin ja radan ympäristöön leviävän värinän voimakkuuteen. Edelleen talvimittaukset antaisivat luotettavamman perustan erotella pohjamaassa tapahtuvien muodonmuutosten osuutta kesän 1999 mittauksissa havaituista ratapenkereen kokonaismuodonmuutoksista. Edellytyksinä uuden mittausjakson toteuttamiselle on luonnollisesti se, että penkereen sisään asennetut mittausinstrumentit ovat säilyneet toimintakuntoisina kaavaillun uuden mittausjakson toteutusajankohtaan asti. Raiteen osalta instrumentointi on uutta mittausjaksoa varten rakennettava uudelleen, mutta

jossain määrin instrumentointi voidaan tällöin kuitenkin toteuttaa kesän 1999 mittauksia yksinkertaisempuna. (Peruttu leudon talven takia.)

8. ROUTALEVYT

8.1 Esiselvitys routalevyistä

Routalevytutkimus tehtiin Teknillisen korkeakoulun tielaboratoriossa kesällä 1999. Raporttia ei julkaista. Tutkimus toteutettiin siten, että Turengin ratapihan yhteydestä kaivettiin esille routalevy- ja raideseppelinäytteitä. Lisäksi kartoitettiin radassa olevien routalevyjen sijaintipaikkoja yhteistyössä VR-Rata Oy:n kanssa.

Routalevytutkimuksen päätelminä voidaan routalevyistä ja mahdollisten raskaiden akselipainojen vaikutuksesta todeta seuraavaa:

- Käytössä olevat routalevyt eivät välttämättä kestä nykyisiäkään akselipainoja rikkoutumatta ja kostumatta.
- Routalevyn asennustapa ja -materiaalit vaikuttavat ilmeisen paljon levyn pinnan kestävyyskykyyn. Raskaammat akselipainot saattavat nopeuttaa levyn pintarakenteen rikkoutumista.
- Raideseppelin hienontuminen kerää kosteutta levyjen pintaan.
- Routalevyjen käyttöä ja käytön mielekkyyttä pitäisi selvittää lisätutkimuksilla.
- Routalevynäytteenotto on mahdollista tehdä käsityönä. Aikamenekki on 1-1½h näytettä kohti, jos ryhmässä on kaksi henkilöä.

8.2 Liite esiselvitykseen routalevyistä

Syksyllä 1999 routalevytutkimusta jatkettiin. Näytteitä otettiin Siilinjärvellä ja Inkeröissä. Jatkotutkimus raportoitiin liitteenä esiselvitykseen. Seuraavassa jatkotutkimuksen huomioita:

- Kun asennetaan kaksi levyä päällekkäin, säilyy alempi varmemmin ehjänä ja koko eristeen lämmöneristyskykyyn voisi olettaa pysyvän parempana kuin vain yhden paksumman levyn asennuksissa. Erityisesti Siilinjärvellä oli asennettu kaksi levyä päällekkäin, vaikka saatujen tietojen mukaan kuviteltiin siellä olevan vain yksikerroksisia levyjä.
- Inkeröissä levyt olivat ilmoitettua syvemmällä. Syynä oli vaihteiden läheisyys. Siksi ei Inkeröiden näytteenotto ole verrattavissa muihin. Syvimmällä (Kv-90) olivat levyt säilyneet ehjimpinä.
- Merkittävintä oli, että jo yhdessä vuodessa levyjen pinta rikkoontuu ja vesi pääsee tunkeutumaan levyyn. Selvää on, ettei levyn lämmöneristyskyky ole silloin enää alkuperäisen veroinen.

- Kuitenkaan eivät 19 vuotta vanhat levyt olleet ollenkaan niin huonossa kunnossa kuin pelättiin, vaan pikemminkin päinvastoin. Kaksikerrosrakenne ja hiekkasuojaus ylläpitävät eristeen toimintakykyä hyvin.
- Näytteiden ottaminen sujui Siilinjärvellä hyvin, koska raideseepeli oli rakeisuudeltaan hienompaa kuin muissa kohteissa.

Routalevyjen kuntotarkastelussa on monta muuttujaa:

- levyn tyyppi
- paksuus
- yksi vai kaksi kerrosta
- asennussyvyys ja
- suojaus

Vähällä näytemäärällä ei routalevyjen nykytilasta saada varmaa tietoa. Näytteenotto-menetelmiä tulee kehittää.

8.3 Olemassa olevien routalevyjen kunnon kartoittaminen

Olemassa olevien routalevyjen kunnon kartoittamista jatketaan eri ikäisten ja eri valmistajien routalevyihin kohdistettavilla tutkimuksilla.

8.4 Uudet routalevyt

Uusille routalevyille asetettavien teknisten toimitusehtojen edellyttämät teoreettiset ja kokeelliset tutkimukset.

- Kysymykseen tulevien routalevymateriaalien kestävyys väsyttävälle sykliselle kuormitukselle tulisi testata eri kuormitus- ja muodonmuutostasoilla kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa tehtävin kuormituskokein. Tavoitteena olisi tällöin määrittää erilaisia palautumattoman muodonmuutoksen tasoja vastaava syklisen kuormituksen ja sallitun kuormituskertamäärän välinen riippuvuus.
- Koska hyvin pitkäaikaisten syklisen kuormituskokeiden laajamittainen tekeminen routalevyjen rutiininomaisen laadunvalvonnan yhteydessä ei välttämättä ole tarkoituksenmukaista eikä mahdollistakaan, tulisi syklisen kuormituksen keston ja routalevyn staattisen puristuslujuuden välinen yhteys pystyä todentamaan. Koemenetelmänä tähän olisivat edellisen kohdan syklisissä kuormituskokeissa testattaville routalevymateriaaleille tehtävät staattiset puristuskokeet.
- Sepelinseulonnan yhteydessä suoraan tukikerroksen alle asennettavien routalevyjen pinnan vaurioitumisalttiutta ja vaurioitumisen vaikutusta levyn sisään syklisen kuormituksen yhteydessä mahdollisesti pumppautuvan veden määrään tulisi testata kuormituskokeilla, joissa veden alle upotettuun routalevyyn kohdistuva kuormitus välitetään levyn pintaan karkean sepelikerroksen välityksellä. Samalla koejärjestelyllä olisi mahdollista testata levyn pinnan suojaukseen mahdollisesti

sovellettavissa olevien menetelmien – esimerkiksi geotekstiilin tai vahvisteverkon kiinnittäminen levyn pintaan – vaikutusta ja tehokkuutta.

- Toinen routalevyjen mekaanisen käyttäytymisen kannalta todennäköisesti tarkempia selvityksiä edellyttävä asia on levyjen dynaaminen käyttäytyminen erityisesti nopean liikenteen vaikutuksen alaisena. Liian joustavalla routalevymateriaalillahan vaarana saattaisi olla ratapenkereen yläosan haitallinen ja pahimmillaan jopa vaarallinen resonanssivärähtely, jos penkereen yläosan ominaistajuus alkaisi lähestyä kuormituksesta aiheutuvaan herätteen taajuutta. Lähestymistapana tämän ongelman selvittämiseen tulisi olla ratarakenteen yläosan dynaamisen käyttäytymisen analysointi ja mallinnus, jonka lähtötietoina tarvittavat routalevyjen ominaisuudet saataisiin pääosin edellisissä kohdissa jo mainittujen laboratoriotestausten tuloksena. Analysoinnissa tarvittavat rakennekerrosten maamateriaalien dynaamiset ominaisuudet voidaan myös määrittää asianomaisia laboratoriotutkimusmenetelmiä käyttäen.

9. MATKAT

9.1 Venäjä

Seppo Kähkönen ANSERI-Konsultit Oy:stä ja Wladimir Segercrantz VTT Yhdyskuntatekniikasta (VTT/YKI) tutustuivat Venäjän rautateillä käytettäviin akselipainoihin ja tulevaisuuden suunnitelmiin. Matkaraportti ilmestyi VTT Yhdyskuntatekniikan julkaisuna (Tutkimusraportti 501/1999) nimellä: **Selvitys 25 - 30 tonnin akselipainon vaikutuksesta radan mitoitusparametreihin ja radan kunnossapitoon Venäjän rautateillä.**

Entisenä Neuvostoliiton aikana rautateiden kapasiteetistä oli pula. Ongelmaa yritettiin ensin ratkaista ylipitkillä junilla. Seuraavaksi otettiin käyttöön 257,5 kN:n akselipaino, jonka mukaista liikennettä sallittiin vuosina 1985 - 1991. Kaluston asiantuntijat pitivät kokeilua tyydyttävänä, vaikka telien varaosien tarve kasvoikin merkittävästi. Myös radan päällysrakenne kesti kokeilun hyvin. Kiskon kiinnitystarvikkeita tosin kului kunnossapidossa merkittävästi aiempaa enemmän. Alusrakenteen osalta kokeilu oli erityisesti yli 3 m korkeiden penkereiden osuuksilla paikoin jopa katastrofaalinen. Myös sillat aiheuttivat ongelmia.

Vuonna 1999 suurin sallittu akselipaino tavaravaunuilla on 235 kN ja vetureilla 250 kN. Tulevaisuudessa Venäjän rautateillä tavoitteena on nostaa akselipainoa tärkeillä pääkäytävillä. Tätä varten käynnistettiin laaja tutkimus ja kehittämisohjelma, joka koskee sekä kalustoa että rataverkkoa. Tavoitteena on vuonna 2005 sallia 250 kN:n akselipaino 120 km/h nopeudella. Tärkeimmät ja taloudellisesti kalleimmat toimenpiteet kohdistuvat sekä alusrakenteen ja siltojen parantamiseen että kaluston kehittämiseen.

9.2 Ruotsi

Luulaja

Tutkimusprojektin yhteydessä toteutettiin tutustumismatka Luulajaan. Matkalle lähti RHK:n edustajien lisäksi sekä Teknillisen korkeakoulun että Tampereen teknillisen korkeakoulun tutkimusprojektissa mukana olevia henkilöitä. Luleå Tekniska Universitetin (LTU) tutkimukset ja Banverketin malmirata olivat ensisijaisesti kiinnostuksen kohteina kontaktien luomisen ohessa. Matkaraporttia ei ole julkaistu.

Seuraavassa luetellaan joitain matkaraportista poimittuja huomioita:

Malmiradalla on yhteensä noin 800 rumpua. Näistä 5 hajosi heti ensimmäisen raskaan (300 kN) junan testiajossa. Tällä hetkellä 100 rumpua on jo korjattu. Yhteensä korjataan tai uusitaan 60% kaikista rummuista. Tämä maksaa noin 100 MSEK.

Siltojen aukot kannattaa sijoittaa veden virtauksen suuntaisesti, jolloin säästetään betonirauδοituksessa. Suomessa siltojen aukot on perinteisesti tehty rataa nähden kohtisuorasti, jolloin joudutaan yleensä rakentamaan pidempi silta.

Sepelikiviaines on paikallista ja laadultaan melko hyvää, mutta hieman vaihtelevaa (silmämääräinen arvio R2 - R3, sprödhetstall <50). Sepelin puhdistus pitäisi tehdä koko alusrakenteen leveydeltä (ruotsalaisilla on tätä tehtävää varten uusi kone), jotta voidaan estää veden keräytyminen radan alle. Jos seperi puhdistetaan pelkästään raiteen alta, padottavat reunat helposti vettä.

Malmiradalla oli pieniä malmipellettejä pitkin matkaa sepelin joukossa. Jos pelletit ovat riittävän kestäviä, ne tukevat tukikerosta, mutta hajotessaan ne muuttavat sepelin vedenläpäisevyysominaisuuksia (todennäköisesti pelletit jauhautuvat). Pellettien vaikutus tukikerrokseen on tutkimuksen alla. Pellettejä on yritetty poistaa imuroimalla, koska pelletit eivät ole magneettisia (hematiittia). Vaunujen pohjaluukkujen mekanisme on parannettu pitävämmäksi.

Venäläisen 245 kN:n ja ruotsalaisen 300 kN:n akselipainoisten vaunujen jousittamaton massa on ilmeisesti sama. Ruotsalaiset vaunut pidetään kuitenkin hyvässä kunnossa, joten on aihetta olettaa, että vaunut vastaavat toisiaan radan rasitusten suhteen, vaikka venäläinen akselipaino onkin pienempi.

Ruotsalaisen rautatien penger on huomattavasti suomalaista leveämpi. Tällä saattaa olla vaikutusta radan vakavuuteen. Leveämmästä penkereestä huolimatta ajojohtimen pylväät olivat tasaisesti kallistuneet radasta ulospäin. Näytti ilmeiseltä, että raskaat junat ovat aiheuttaneet tukikerrokseen painetta sivuille.

300 kN:n akselipainon projekti alkoi vuonna 1995. Banverket on sijoittanut 140 MSEK vuodessa malmirataan. Tästä 30 MSEK on mennyt kiskoihin. MTAB (malmyhtiö) on sijoittanut 40 MSEK vuodessa vaunujen kunnossapitoon. Tästä puolet on kulunut pyöriin. Projektissa on hyödynnetty Kanadassa tehtyjä tutkimuksia (sama ilmasto). Mukana on Ruotsin muitakin yliopistoja, mutta niiden merkitys on melko vähäinen. Lähtökohtina tutkimuksessa olivat: paino, liikenne, kylmyys ja ilmasto. T2K2 (Tunga Transporten Kallt Klimat).

Koska rautatiealalla ei ollut mitään keskitettyä tutkimustoimintaa ja malmirata selvästi sellaista kaipasi, perustettiin JvtC (Järnvägstekniskt Centrum). Suunniteltu 300 kN:n akselipaino on suurin Euroopassa! Kylmä ilmasto, sekaliikenne ja aiemmin tehty vain kevyeen liikenteeseen keskittyvät tutkimukset lisäsivät tutkimuksen mielenkiintoa. Kuljetuskustannukset pienenevät 15 %, jos käytetään normaalia (250kN:n akselit/52 vaunua) pidempää malmijunaa. Vaikutus on -30%, jos lisäksi akselipainot kasvatetaan 300kN:iin. Suurempi akselipaino pienentää bruttokuormitusta, eli vaunujen suhteellinen osuus massasta pienenee.

Tukholma ja Göteborg

Tutkimusprojektin yhteydessä toteutettiin myös haastattelumatka Tukholmaan, KTH:n Jord- och Bergmekanik -osastolle. Matkan tarkoituksena oli tutustua ja haastatella KTH:n tärinäasiantuntijoita ja saada tietoa tärinään ja sen vähentämiseen vaikuttavista asioista. Lisäksi tehtiin matka Göteborgiin Chalmersin teknillisen korkeakoulun Solid Mechanics -osastolle tutustumaan paikallisiin asiantuntijoihin. Göteborgissa järjestetyn miniseminaarin aiheena oli radan staattinen ja dynaaminen käyttäytyminen.

- 1/1997 Railway Industry Structures and Capital Investment Financing
2/1997 Nopean junaliikenteen aluekehitysvaikutukset
3/1997 Rautateiden henkilöliikenteen ennustemalli (RALVI)
4/1997 Kilpailuedellytykset ja niiden luominen Suomen rataverkolla
5/1997 Rataverkon tavaraliikenne-ennuste 2020
1/1998 Rataverkon jatkosähköistytksen yhteiskuntataloudellinen vaikutusselvitys
2/1998 Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä (RAILI 96)
3/1998 Rautateiden tavarakuljetusten laatutekijät
4/1998 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoiminta 1997 - 99
5/1998 Rataverkon kehittämisen yhdyskuntarakenteellisten vaikutusten ja menetelmien arviointi
6/1998 Yksityisrahoituksen käyttömahdollisuudet Suomen ratahankkeissa
1/1999 Ratarakenteen instrumentoinnin kirjallisuustutkimus,
250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
2/1999 Rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat
ympäristökustannukset
3/1999 Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
4/1999 Ratarakenteen instrumentointi- ja mallinnussuunnitelma, 250 kN:n ja
300 kN:n akselipainot
5/1999 Rautatietärinän mittauskäytäntö Pohjoismaissa
6/1999 Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus,
250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
7/1999 Rautatiesiltojen luokittelu ja inventointi rataosuudella Rautaruukki-
Haaparanta akselipainojen korottamista varten
8/1999 Ratarumpujen maastoeselvitys, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot
1/2000 Rataverkko 2020 -ohjelman väliraportti. Kehittämisvaihtoehtojen
vaikutustarkastelut
2/2000 Bantrummor, 250 kN och 300 kN axellaster
3/2000 Liikkuvan kaluston kirjallisuustutkimus
4/2000 Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen ikään
5/2000 Ratarakenteen instrumentointi ja mallinnus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot

RATAHALLINTOKESKUS
KAIVOKATU 6, PL 185
00101 HELSINKI

TEKNINEN YKSIKKÖ

Lisätietoja: Pasi Leimi, puh. (09) 5840 5184, sähköposti: pasi.leimi@rhk.fi
Jakelu: Sinikka Kiikka, puh. (09) 5840 5192, sähköposti: sinikka.kiikka@rhk.fi

ISBN 952-445-035-6
ISSN 1455-2604